Применение БПЛА-измерений для оценки динамики прикромочной ледовой зоны в Карском море

В. Р. Жук [1], И. Е. Козлов [1], А. А. Кубряков [1], Д. М. Соловьев [1], А. А. Осадчиев [2, 3], Н. Б. Степанова [2, 3]

[1] *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия*
E-mails: zhuk-vlad1slav@ya.ru, igor.eko@gmail.com
[2] *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия*
[3] *Московский физико-технический институт (НИУ)*
Долгопрудный, 141701, Московская обл., Россия

На основе совместного анализа измерений беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), а также контактных измерений выполнена оценка мелкомасштабной и субмезомасштабной динамики прикромочной ледовой зоны (ПЛЗ) в двух районах Карского моря. Измерения проводились на двух ледовых полигонах, расположенных в восточной части Карского моря, в августе 2021 г. в рамках 58-го рейса НИС «Академик Иоффе». В этих районах глубины опреснённого слоя варьировались от 0,5 до 2,5 м. Анализ приповерхностных измерений солёности, выполненных по ходу движения судна, показал выраженное меандрирование опреснённых областей, которое связано с неравномерным таянием льда. С помощью спутниковых РСА-наблюдений идентифицированы вихревые структуры в ПЛЗ, а также кратко описана её эволюция. Продемонстрированы возможности применения серийных БПЛА для исследования мелкомасштабной динамики ПЛЗ. На одном из полигонов в поле дрейфующего льда обнаружен выраженный антициклонический вихрь. Рассчитанные по данным БПЛА-измерений значения модуля скорости льда в антициклоне достигали 0,7 м/с и были обусловлены в первую очередь динамикой верхнего слоя океана, а не ветровым воздействием. Анализ кинематических характеристик дрейфа льда по данным БПЛА и измерений ветра на станциях показал ключевую роль агеострофической компоненты в поле скорости ледового дрейфа.

Ключевые слова: дрейф льда, мелкомасштабная изменчивость, субмезомасштабная динамика океана, прикромочная ледовая зона, беспилотные летательные аппараты, спутниковая радиолокация морской поверхности, Карское море, Северный Ледовитый океан

Одобрена к печати: 03.10.2022
DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-235-245

Введение

В Арктике наблюдаемые за последние несколько десятков лет климатические изменения происходят как минимум в два раза быстрее, чем в остальных районах Земли (Bekryaev et al., 2010). По данным многолетних наблюдений известно, что также изменяется и концентрация многолетних льдов. Недавние работы показывают, что одновременно с уменьшением площади льдов отмечается долговременный положительный тренд изменения скорости дрейфа льда (Olason, Notz, 2014; Spreen et al., 2011). Также известно, что с начала 2000-х гг. возросла роль ветра в изменчивости скорости ледового дрейфа (Spreen et al., 2011).

Изучение мелкомасштабных динамических процессов в прикромочной ледовой зоне (ПЛЗ) Северного Ледовитого океана (СЛО) особенно важно для понимания взаимодействия в системе «океан – морской лёд – атмосфера». Кроме того, с наблюдающимся уменьшением площади многолетних льдов становится актуальным изучение быстро меняющихся процессов, которые происходят на периферии ледового поля. Сведения о скорости дрейфа льда, к примеру, необходимы для улучшения продуктов о потоке талой воды (Кускова и др., 2021). ПЛЗ исследовалась во многих работах с помощью численных моделей (Manucharyan, Thompson, 2017) и контактных измерений (Марченко и др., 2016; Cole et al., 2017; Toyota et al., 2011). В частности, было показано, что первоочередным механизмом генерации вихревых

структур в районах ПЛЗ является сформированная значительными перепадами плотности неустойчивость течений, которая образуется на границе прикромочной зоны. Как правило, значительная разница в плотности обусловлена таянием льда, ветровым апвеллингом и т. п. (Manucharyan, Thompson, 2017). В настоящее время на основе анализа спутниковых радиолокационных данных обобщена информация о вихревых процессах в различных районах СЛО, включая области ПЛЗ (Артамонова и др., 2020; Atadzhanova et al., 2017; Kozlov, Atadzhanova, 2022; Kozlov et al., 2019). Также известно несколько работ, в которых определялись кинематические характеристики дрейфа льда на основе анализа последовательных спутниковых измерений по данным РСА (радиолокаторы с синтезированной апертурой) (Kozlov et al., 2020; Wang et al., 2021) и в оптическом диапазоне (Lopez-Acosta et al., 2019; Manucharyan et al., 2022). В исследовании (Atadzhanova et al., 2017) отмечается, что в Карском море около 40 % вихревых структур регистрировалось в августе. Основная причина их образования — фронтальная неустойчивость, возникающая за счёт взаимодействия модифицированного речного стока и арктических вод. Большая часть вышеперечисленных результатов посвящена в основном мезо- и субмасштабным процессам. Вместе с тем сведений о мелкомасштабной изменчивости ПЛЗ в настоящее время крайне мало. Одним из исключений стала работа (Cole et al., 2017), в которой представлены результаты анализа измерений свободно дрейфующих вмонтированных в лёд профилографов в канадском бассейне СЛО.

Съёмка с серийно выпускаемых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в оптическом диапазоне позволяет получать информацию о яркости восходящего излучения. Таким образом, собранные данные пригодны для большого перечня задач: создания карт батиметрии (Новиков и др., 2021; Bergsma et al., 2019), выделения донной растительности (Панкеева и др., 2020), исследования субмезомасштабных и более мелких процессов и явлений верхнего слоя моря (Кубряков и др., 2021; Yurovsky et al., 2022). Использование современных БПЛА может быть также эффективным для оценки быстропротекающих процессов на краю и внутри ПЛЗ.

В настоящей работе на основе комплексного анализа квазисинхронных гидрологических измерений, БПЛА-съёмки и спутниковых РСА-наблюдений проводится исследование характеристик ПЛЗ в августе 2021 г. в двух районах Карского моря.

Данные и методы

Для исследования динамики ПЛЗ был проведён ряд измерений в ходе 58-го рейса научно-исследовательского судна (НИС) «Академик Иоффе» в рамках программы «Плавучий университет ИО РАН» (Институт океанологии им. П. П. Ширшова). На *рис. 1* (см. с. 237) красным цветом показаны места выполнения работ на двух ледовых полигонах, которые совпадают с положением прикромочной фронтальной зоны для этого периода года (Коник и др., 2019). 19 августа 2021 г. (ст. 3965–3967) к северу от о-вов Известий ЦИК совершено три вылета БПЛА. На втором ледовом полигоне, выполненном 20 августа 2021 г. к востоку от о. Визе, осуществлены две съёмки БПЛА на ст. 3969 и 3970, а также четыре вылета во время движения судна внутри ПЛЗ. Для оценки толщины опреснённого слоя вблизи и внутри ПЛЗ использовались данные СТД-профилей (солёность – температура – давление) на обозначенных станциях.

В работе использовались данные БПЛА DJI Mavic 2 Pro (https://www.dji.com/mavic) в оптическом видимом диапазоне. Максимальное разрешение при съёмке фото составляет 5472×3648 пикселей, видео — 3840×2160 пикселей при 30 кадрах в секунду. Максимальная высота подъёма равна 500 м, угол обзора — 77°, что при съёмке в надир позволяет наблюдать за сценой около 200×300 м.

Измерения солёности по ходу движения выполнены с помощью бортового термосалинографа SBE21. Профили СТД на гидрологических станциях получены с помощью зонда SBE-9p. Для исследования динамики ПЛЗ анализировались данные спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой Sentinel-1A/B с пространственным разрешением около 90 м.

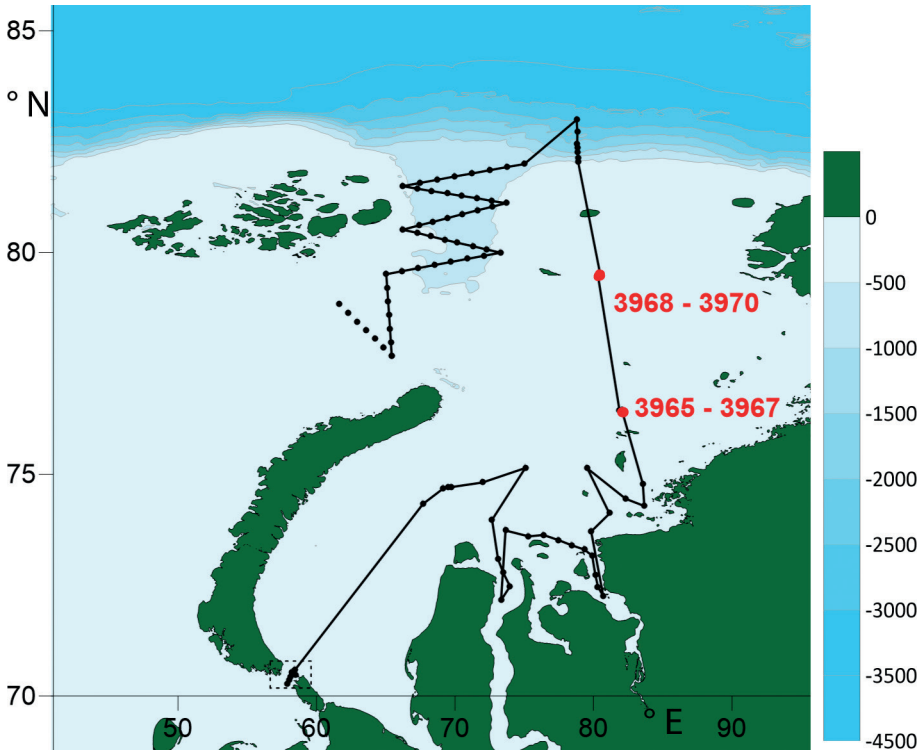


Рис. 1. Расположение станций 58-го рейса НИС «Академик Иоффе» и батиметрия Карского моря (показана цветом). Красным цветом обозначены ледовые полигоны

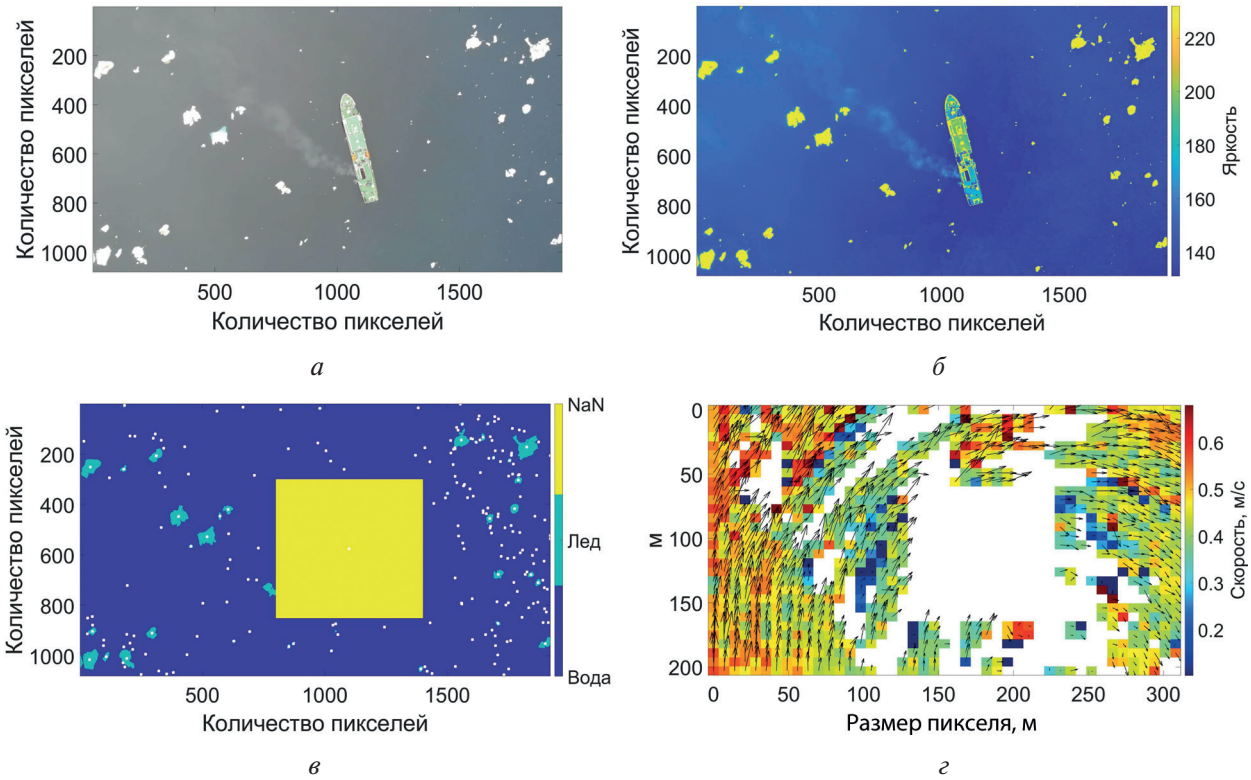


Рис. 2. Пример обработки данных с БПЛА на ст. 3969: *а* — кадр в видимом диапазоне; *б* — восходящая яркость кадра; *в* — идентификация льдин (бирюзовый цвет) и их центров (белые точки) по яркости, жёлтый квадрат обозначает площадь, не учитываемую в дальнейшей обработке; *г* — рассчитанное поле скорости дрейфа льда, белый цвет — отсутствие данных

Анализ скорости льда проводился по измерениям БПЛА, выполненным в надир с высоты 500 м. Пример стоп-кадра для одной из сцен показан на *рис. 2а* (см. с. 237). Льдины идентифицировались по яркости восходящего излучения (*рис. 2б*). Бирюзовым цветом выделен лёд. Далее производился расчёт центров льдин для каждого кадра. На *рис. 2в* центры обозначены белым цветом. Области, соответствующие положению судна, а также области, в которых присутствовало воздействие судна на поле скорости, были убраны из анализа. На следующем шаге вычислялась скорость смещения льдин по известной разнице в положении центров льдин между соседними кадрами. Перевод пикселей в метры проводился из расчёта пикселей для центральной части кадра, когда 6 пикселей были равны 1 м. Также учитывалось меридиональное и зональное смещение квадрокоптера во время съёмки. Для определения среднего поля скорости дрейфа льда была произведена бинаризация в ячейках 7×7 м. Отметим, что средняя площадь идентифицированного льда в приведённых сценах составила около 2 %. Сумма вертикальных турбулентных потоков через подобные части ПЛЗ в среднем на 10 Вт/м^2 больше, чем в районах с более высокой сплочённостью льда (15–60 %) (Selivanova et al., 2021).

Результаты

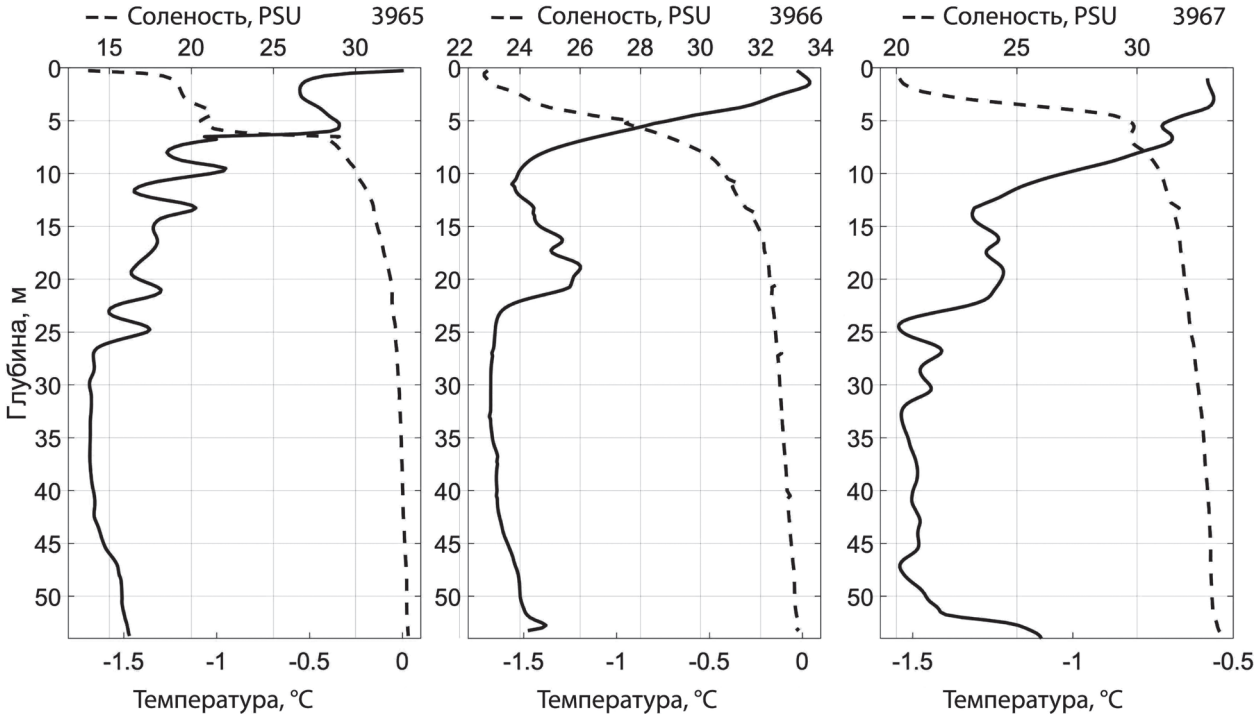
На *рис. 3а* и *б* (см. с. 239) представлены профили солёности на станциях, которые были получены на первом и втором ледовых полигонах соответственно. Данные профили свидетельствуют о наличии опреснённого слоя, образованного в первую очередь таянием льда (Кускова и др., 2021). На первом ледовом полигоне поверхностная солёность изменяется в наиболее широких пределах от 14 до 28 PSU (*англ.* Practical Salinity Units, практические единицы солёности) (см. *рис. 3а*). На этом же ледовом полигоне зафиксированы максимальные глубины опреснённого слоя, которые составляют: 2,5 м — для ст. 3965; 1,6 м — для ст. 3966 и 1,3 м — для ст. 3967.

Во время гидрологических измерений наблюдались неблагоприятные для съёмки с БПЛА погодные условия (туман, снег), что затруднило восстановление поля течений. Поэтому в настоящей работе приведены расчёты кинематических характеристик для ледового полигона № 2 (*рис. 5*). Тем не менее полученная с БПЛА информация позволила улучшить визуальную оценку сплочённости льда.

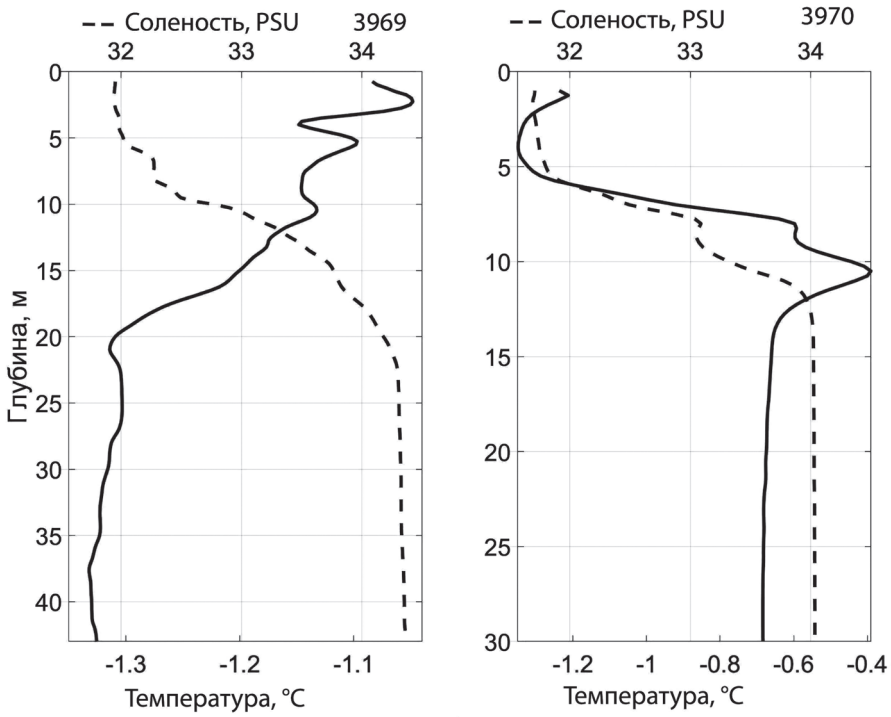
На *рис. 4* (см. с. 240) показан фрагмент РСА-снимка в районе проведения первого ледового полигона. По измерениям поверхностной солёности можно выделить область, подверженную влиянию речного стока южнее о-вов Арктического института, где значения солёности составляли до 15 PSU. Севернее о-вов Известий ЦИК солёность возрастает свыше 20 PSU и постепенно увеличивается при возрастании широты. На *рис. 4б* более детально видны очертания ледовых структур. Несмотря на тенденцию увеличения солёности с широтой, внутри ПЛЗ наблюдаются вариации и в обратном направлении, которые, по-видимому, связаны с неравномерным таянием льда. Так, на более «северной» ст. 3965 и в измерениях параллельно ей солёность не превышает 22 PSU, в то время как на «южных» ст. 3966–3967 и между ними фиксируются значения от 25 PSU. Такое распределение солёности, вероятно, свидетельствует о неравномерном потоке талой воды в ПЛЗ, который также проявляется в меандрировании прикромочной фронтальной зоны (Коник и др., 2019). Как видно из *рис. 3б*, на втором ледовом полигоне пределы измеряемой солёности значительно сократились. Значения поверхностной солёности варьируются от 31 до 34 PSU. Уменьшилась до ~0,5 м также и глубина опреснённого слоя, что говорит о падении интенсивности таяния льда.

На *рис. 5а* (см. с. 240) представлено рассчитанное поле скорости дрейфа льда на ст. 3969. Отметим выраженную антициклоническую направленность дрейфа льда на данной станции. Полученные значения скорости находятся в диапазоне 0,2–0,7 м/с. Ветер во время съёмки имел южное направление (см. розу ветров на *рис. 5а*), а его скорость, по данным судовой метеостанции, в среднем составила 4,9 м/с. Определив ветровую компоненту скорости дрейфа льдин в качестве 3 % от скорости ветра, получим, что она должна достигать значений, не превышающих ~0,15 м/с. Такие скорости наблюдаются в поле дрейфа отдельных областей в кадре, однако значительная часть скорости превосходит данное значение и может быть связана

с агеострофической компонентой скорости поверхностных течений. Эти течения в первую очередь обусловлены собственной динамикой поверхностного слоя моря. Наблюдаемая изменчивость направлений дрейфа льда на столь малых пространственных масштабах при постоянном северном ветре также свидетельствует в пользу предположения о доминировании агеострофической составляющей в поле поверхностных течений.



а



б

Рис. 3. Профили солёности и температуры на первом (*а*) и втором (*б*) ледовых полигонах. Штрихованной линией обозначены измерения солёности

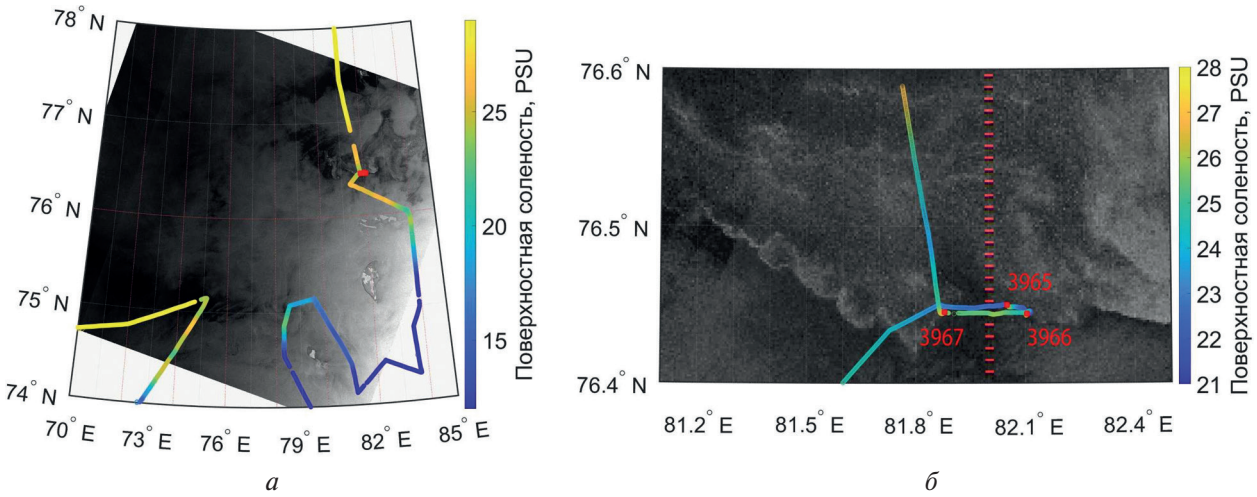


Рис. 4. РСА-снимок за 17 августа 2021 г. (*а*). Увеличенный фрагмент снимка в районе первого ледового полигона (*б*). Красные точки показывают места выполненных станций; цветом обозначена измеряемая по ходу движения судна поверхностная солёность. Обратите внимание, что пределы шкалы для увеличенного фрагмента отличаются от пределов исходного снимка

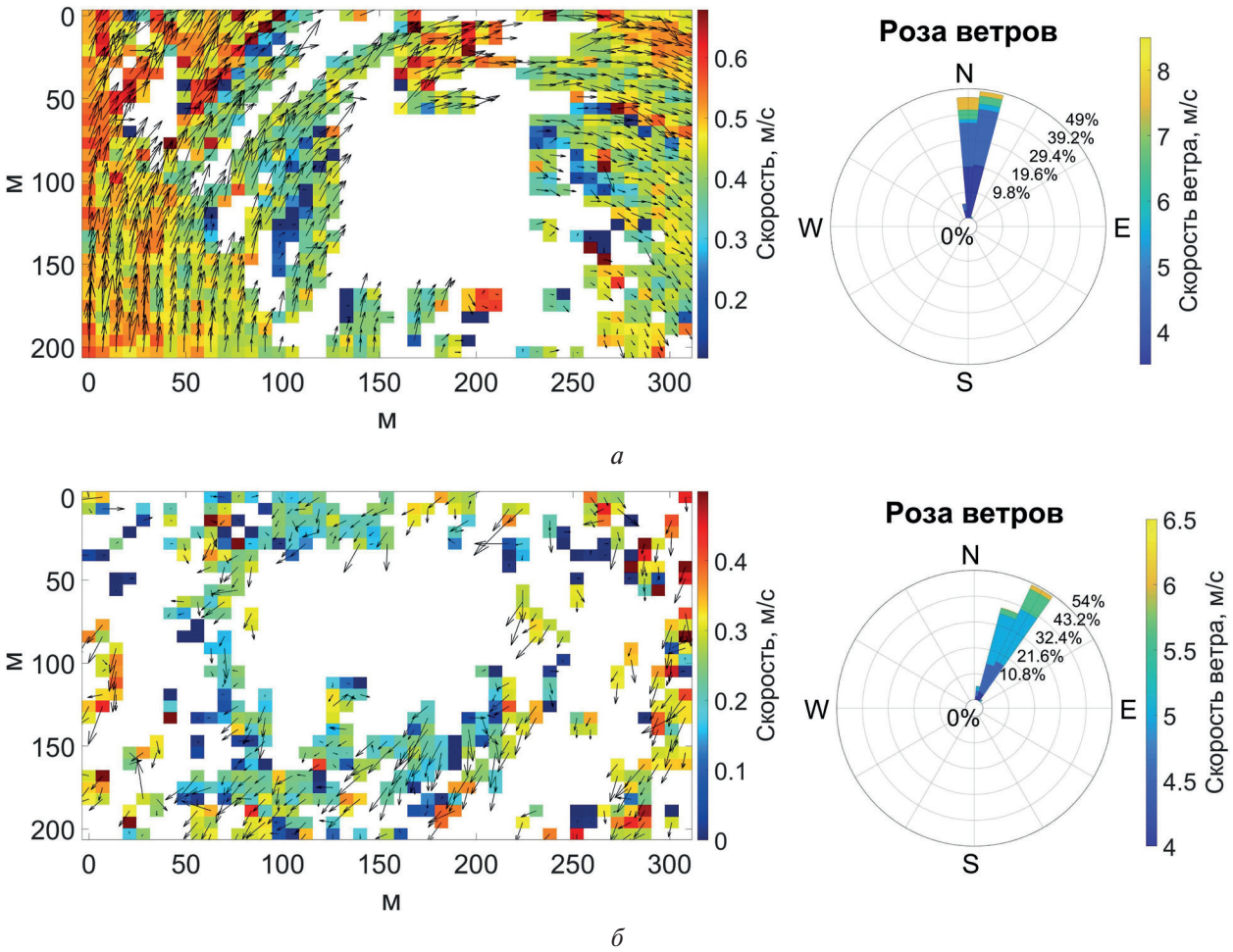


Рис. 5. Рассчитанное поле скорости дрейфа льда и роза ветров: *а* — на ст. 3969 (*а*); *б* — на ст. 3970

Напротив, на *рис. 5б* фиксируется практически полное соответствие направления дрейфа ледового поля с направлением ветрового воздействия. Скорость движения льдин достигает 0,5 м/с. Тем не менее средняя скорость северо-восточного ветра на ст. 3970 составила

5 м/с. Таким образом, воздействия наблюдаемого ветра недостаточно, чтобы вызвать полученные скорости дрейфа льда. По-видимому, эти скорости также имеют агеострофическую составляющую.

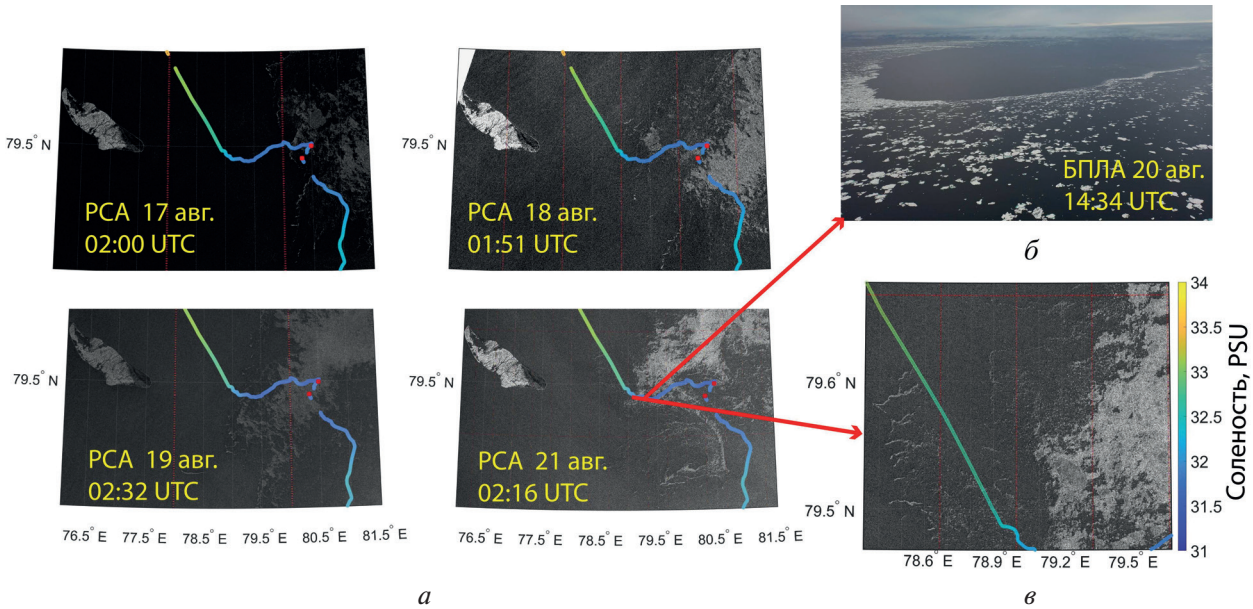


Рис. 6. Эволюция ПЛЗ на спутниковых РСА-изображениях Sentinel-1 за 17–19 и 21 августа 2021 г. (*а*); пример БПЛА-съёмки с характерным распределением льда вблизи вихревой структуры (*б*); увеличенный фрагмент РСА-изображения за 21 августа 2021 г. (*в*)

Как уже отмечалось, регион проведения измерений характеризуется повышенным количеством вихревых структур (Atadzhanova et al., 2017). На *рис. 6а* представлены РСА-снимки за 17–21 августа 2021 г. На них чётко прослеживается эволюция ПЛЗ в районе 78° 30′–81° 30′ в. д., 79°–79° 48′ с. ш. Так, 17 августа ПЛЗ ограничена с запада 80° в. д., однако через сутки наблюдаемый фронт сдвигается практически до 79° в. д. На последующих снимках за 19 и 21 августа фиксируется перестройка ПЛЗ в прежних районах и образование вихревых структур диаметром около 10–14 км в области 79° 24′–79° 36′ с. ш., 78° 30′–79° 30′ в. д., что существенно больше среднего значения (2,4 км) для Карского моря (Atadzhanova et al., 2017). Одна из таких структур также была идентифицирована по данным БПЛА во время сьёмки по ходу движения судна 20 августа (*рис. 6б*), когда спутниковые РСА-изображения не были доступны.

Дискуссия и заключение

Мезомасштабная и субмезомасштабная динамика играет большую роль в переносе энергии в СЛО (Kozlov et al., 2020; Selivanova et al., 2021). На основе имеющегося набора данных была показана возможность совместного применения измерений серийного БПЛА и спутниковых радиолокационных снимков для отслеживания разномасштабных процессов в прикромочной зоне северо-восточной части Карского моря. Гидрологические измерения позволили оценить глубину и пространственное распределение опреснённого слоя в ПЛЗ. Полученные с БПЛА данные в оптическом диапазоне позволили реконструировать кинематические характеристики ПЛЗ. На ст. 3969 главной особенностью мелкомасштабной динамики стал ярко выраженный антициклонический вихрь. Восстановленные скорости дрейфа льда в антициклоне составили до 0,7 м/с и были вызваны в первую очередь собственной циркуляцией моря, а не дрейфовыми течениями. При дальнейшем усовершенствовании алгоритма обработки возможно получение дополнительных данных о состоянии ПЛЗ во время осадков, при

выраженном волнении, а также при съёмке под углом к морской поверхности. Особенно интересным представляется использование данных с БПЛА одновременно с натурными измерениями толщины льда, как это сделано, например, в работе (Toyota et al., 2011) для оценки таяния льда в зависимости от распределения площадей льдин.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 21-17-00278 (анализ беспилотных и спутниковых измерений), а также в рамках государственного задания № FNNN-2021-0010 (разработка методов анализа БПЛА-измерений). Данные натурных измерений получены в 58-м рейсе НИС «Академик Иоффе» в рамках программы «Плавучий университет ИО РАН» при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Московского физико-технического института (НИУ) и ИО РАН.

Литература

1. *Артамонова А. В.*, *Козлов И. Е.*, *Зимин А. В.* Характеристики вихрей в Чукотском море и море Бофорта по данным спутниковых радиолокационных наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 203–210. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-203-210.
2. *Коник А. А.*, *Зимин А. В.*, *Атаджанова О. А.* Количественные оценки изменчивости характеристик температуры поверхности моря в районе фронтальных зон Карского моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12. № 1. С. 54–61. DOI: 10.7868/S2073667319010076.
3. *Кубряков А. А.*, *Лишаев П. Н.*, *Чепыженко А. И.*, *Алескерова А. А.*, *Кубрякова Е. А.*, *Медведева А. В.*, *Станичный С. В.* Влияние субмезомасштабных вихрей на перенос взвешенного вещества в прибрежной зоне Крыма по данным БПЛА, спутниковых и контактных измерений // Океанология. 2021. Т. 61. № 2. С. 182–197. DOI: 10.31857/S0030157421020106.
4. *Кускова Е. Г.*, *Осадчиев А. А.*, *Фрей Д. И.*, *Степанова Н. Б.* Влияние таяния морского льда на формирование поверхностного опреснения в Карском море // 10-я Международ. научно-практ. конф. «Морские исследования и образование»: сб. тр. Тверь, 25–29 окт. 2021. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2021. С. 242–246.
5. *Марченко А. В.*, *Дианский Н. А.*, *Онищенко Д. А.*, *Чумаков М. М.*, *Никитин М. А.*, *Фомин В. В.*, *Марченко Н. А.* Исследование дрейфа льда и эволюции консолидированного слоя торосов в северо-западном регионе Баренцева моря // Тр. Гидрометеоролог. научно-исслед. центра Российской Федерации. 2016. № 361. С. 231–260.
6. *Новиков Б. А.*, *Кубряков А. А.*, *Федоров С. В.* Восстановление батиметрии по данным бортовой камеры БПЛА в прибрежной акватории Черного моря // Всерос. науч. конф. «Моря России: Год науки и технологий в РФ — Десятилетие наук об океане ООН»: сб. тез. Севастополь, 20–24 сент. 2021. Севастополь: Морской гидрофиз. ин-т РАН, 2021. С. 289–290.
7. *Панкеева Т. В.*, *Миронова Н. В.*, *Новиков Б. А.* Опыт картографирования донной растительности (на примере бухты Ласпи, Чёрное море) // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2020. Т. 6. № 4. С. 154–169. DOI: 10.37279/2309-7663-2020-6-2-154-169.
8. *Atadzhanova O. A.*, *Zimin A. V.*, *Romanenkov D. A.*, *Kozlov I. E.* Satellite radar observations of small eddies in the White, Barents and Kara Seas // Physical Oceanography. 2017. V. 2. P. 75–83. DOI: 10.22449/1573-160X-2017-2-75-83.
9. *Bekryaev R.*, *Polyakov I.*, *Alexeev V.* Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming // J. Climate. 2010. V. 23. P. 3888–3906. DOI: 10.1175/2010JCLI3297.1.
10. *Bergsma E.*, *Almar R.*, *Almeida L. P.*, *Sall M.* On the operational use of UAVs for video-derived bathymetry // Coastal Engineering. 2019. V. 152(103527). DOI: 10.1016/j.coastaleng.2019.103527.
11. *Cole S. T.*, *Toole J. M.*, *Lele R.*, *Timmermans M.-L.*, *Gallaher S. G.*, *Stanton T. P.*, *Shaw W. J.*, *Hwang B.*, *Maksym T.*, *Wilkinson J. P.*, *Ortiz M.*, *Graber H.*, *Rainville L.*, *Petty A. A.*, *Farrell S. L.*, *Richter-Menge J. A.*, *Haas C.* Ice and ocean velocity in the Arctic marginal ice zone: Ice roughness and momentum transfer // Elementa Science of the Anthropocene. 2017. V. 5. No. 55. DOI: 10.1525/elementa.241.
12. *Kozlov I. E.*, *Atadzhanova O. A.* Eddies in the marginal ice zone of Fram Strait and Svalbard from spaceborne SAR observations in winter // Remote Sensing. 2022. V. 14. Art. No. 134. 19 p. DOI: 10.3390/rs14010134.
13. *Kozlov I. E.*, *Artamonova A. V.*, *Manucharyan G. E.*, *Kubryakov A. A.* Eddies in the Western Arctic Ocean from spaceborne SAR observations over open ocean and marginal ice zones. // J. Geophysical Research: Oceans. 2019. V. 124. P. 6601–6616. DOI: 10.1029/2019JC015113.

14. *Kozlov I. E.*, *Plotnikov E.*, *Manucharyan G.* Brief Communication: Mesoscale and submesoscale dynamics in the marginal ice zone from sequential synthetic aperture radar observations // The Cryosphere. 2020. V. 14. P. 2941–2947. DOI: 10.5194/tc-14-2941-2020.
15. *Lopez-Acosta R.*, *Schodlok M. P.*, *Wilhelmus M. M.* Ice Floe Tracker: An algorithm to automatically retrieve Lagrangian trajectories via feature matching from moderate-resolution visual imagery // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 234(111406). DOI: 10.1016/j.rse.2019.111406.
16. *Manucharyan G. E.*, *Thompson A. F.* Submesoscale sea ice-ocean interactions in marginal ice zones // J. Geophysical Research: Oceans. 2017. V. 122. P. 9455–9475. DOI: 10.1002/2017JC012895.
17. *Manucharyan G. E.*, *Lopez-Acosta R.*, *Wilhelmus M. M.* Spinning ice floes reveal intensification of mesoscale eddies in the western Arctic Ocean // Scientific Reports. 2022. V. 12. No. 7070. DOI: 10.1038/s41598-022-10712-z.
18. *Olason E.*, *Notz D.* Drivers of variability in Arctic sea-ice drift speed. // J. Geophysical Research: Oceans. 2014. V. 119. P. 5755–5775. DOI: 10.1002/2014JC009897.
19. *Selivanova J.*, *Verezemskaya P.*, *Tilinina N.*, *Gulev S.*, *Dobrolyubov S.* The importance of the sea ice marginal zone for the surface turbulent heat fluxes in Arctic on the basis of NCEP CFSR reanalysis // Russian J. Earth Sciences. 2021. V. 21(ES2003). DOI: 10.2205/2020ES000744.
20. *Spreen G.*, *Kwok R.*, *Menemenlis D.* Trends in Arctic Sea ice drift and role of wind forcing: 1992–2009 // Geophysical Research Letters. 2011. V. 38. Iss. 19. Art. No. L19501. DOI: 10.1029/2011GL048970.
21. *Toyota T.*, *Haas C.*, *Tamura T.* Size distribution and shape properties of relatively small sea-ice floes in the Antarctic marginal ice zone in late winter // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2011. V. 58(9–10). P. 1182–1193. DOI: 10.1016/j.dsr2.2010.10.034.
22. *Wang M.*, *König M.*, *Oppelt N.* Partial Shape Recognition for Sea Ice Motion Retrieval in the Marginal Ice Zone from Sentinel-1 and Sentinel-2 // Remote Sensing. 2021. V. 13(21). Art. No. 4473. DOI: 10.3390/rs13214473.
23. *Yurovsky Y. Y.*, *Kubryakov A. A.*, *Plotnikov E. V.*, *Lishaev P. N.* Submesoscale Currents from UAV: An Experiment over Small-Scale Eddies in the Coastal Black Sea // Remote Sensing. 2022. V. 14. Art. No. 3364. DOI: 10.3390/rs14143364.

Application of UAV measurements to assess the dynamics of the marginal ice zone in the Kara Sea

V. R. Zhuk [1], I. E. Kozlov [1], A. A. Kubryakov [1], D. M. Solovyov [1], A. A. Osadchiev [2, 3], N. B. Stepanova [2, 3]

[1] *Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia*
E-mails: zhuk-vlad1slav@ya.ru, igor.eko@gmail.com
[2] *Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia*
[3] *Moscow Institute of Physics and Technology*
Dolgoprudny 141701, Moscow Region, Russia

Based on a combined analysis of measurements obtained from unmanned aerial vehicle (UAV), spaceborne synthetic aperture radar (SAR) and in situ measurements, an assessment of the small-scale and submesoscale dynamics in the marginal ice zone (MIZ) in two regions of the Kara Sea was made. The measurements were performed at two ice polygons located in the eastern part of the Kara Sea in August 2021 during the 58th cruise of the RV Akademik Ioffe. The depths of the brackish layer varied from 0.5 to 2.5 m. Analysis of near-surface salinity measurements from ship-mounted flow analyzer showed the meandering of brackish areas associated with uneven ice melting. Based on spaceborne SAR observations, eddy features in the MIZ and the evolution of the MIZ were described. Possibilities of using serial UAV for studying the small-scale dynamics of the MIZ are demonstrated. A pronounced anticyclonic eddy was found at one of the polygons in the field of drifting ice. The values of the ice velocity modulus in the anticyclone calculated from UAV measurements reached 0.7 m/s and were primarily associated with the dynamics of the upper ocean layer, and not with the wind effect. An analysis of the reconstructed ice drift kinematic characteristics from UAV data and wind measurements at the stations showed the key role of the ageostrophic component in the ice drift velocity field.

Keywords: ice drift, small-scale variability, submesoscale dynamics, marginal ice zone, unmanned aerial vehicles, sea surface satellite radar, Kara Sea, Arctic Ocean

Accepted: 03.10.2022
DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-235-245

References

1. Artamonova A. V., Kozlov I. E., Zimin A. V., Characteristics of ocean eddies in the Beaufort and Chukchi Seas from spaceborne radar observations, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 1, pp. 203–210 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-203-210.
2. Konik A. A., Zimin A. V., Atadzhanova O. A., Quantitative estimations of the variability of characteristics of the temperature of the sea surface in the front of the frontal zone of the Kara Sea, *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*, 2019, Vol. 12, No. 1, pp. 54–61 (in Russian), DOI: 10.7868/S2073667319010076.
3. Kubryakov A. A., Lishaev P. N., Chepyzhenko A. I., Aleskerova A. A., Kubryakova E. A., Medvedeva A. V., Stanichnyi S. V., Impact of submesoscale eddies on the transport of suspended matter in the coastal zone of Crimea on the base of drones, satellite and *in situ* measurements, *Okeanologiya*, 2021, Vol. 61, No. 2, pp. 182–197 (in Russian), DOI: 10.31857/S0030157421020106.
4. Kuskova E. G., Osadchiev A. A., Frey D. I., Stepanova N. B., Influence of sea ice melting on formation of the freshened surface layer in the Kara Sea, *10-ya Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Morskie issledovaniya i obrazovanie"* (10th Intern. Scientific-Practical Conf. "MARESEDU-2021"), Book of abst., Tver, 25–29 Oct., 2021, Tver: PoliPRESS, 2021, pp. 242–246 (in Russian).
5. Marchenko A. V., Dianskii N. A., Onishchenko D. A., Chumakov M. M., Nikitin M. A., Fomin V. V., Marchenko N. A., Study of ice drift and the evolution of the consolidated layer of hummocks in the northwestern region of the Barents Sea, *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatelskogo tsentra Rossiiskoi Federatsii*, 2016, No. 361, pp. 231–260 (in Russian).
6. Novikov B. A., Kubryakov A. A., Fedorov S. V., Recovery of bathymetry on the base of UAV onboard camera in coastal water area of the Black Sea, *Vserossiiskaya nauchnaya konferentsiya "Morya Rossii: God nauki i tekhnologii v RF — Desyatiletie nauk ob okeane OON"* (The All-Russia Open Conf. "The Seas of Russia: Year of Science and Technology in the RF — United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development"), Book of Abstr., Sevastopol, 20–24 Sept., 2021, Sevastopol: Morskoi gidrofizicheskii institut RAN, 2021, pp. 289–290 (in Russian).
7. Pankeeva T. V., Mironova N. V., Novikov B. A., Experience in mapping bottom vegetation (for example of Laspi Bay, Black Sea), *Geopolitika i ekogeodinamika regionov*, 2020, Vol. 6, No. 4, pp. 154–169 (in Russian), DOI: 10.37279/2309-7663-2020-6-2-154-169.
8. Atadzhanova O. A., Zimin A. V., Romanenkov D. A., Kozlov I. E., Satellite radar observations of small eddies in the White, Barents and Kara Seas, *Physical Oceanography*, 2017, Vol. 2, pp. 75–83, DOI: 10.22449/1573-160X-2017-2-75-83.
9. Bekryaev R., Polyakov I., Alexeev V., Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming, *J. Climate*, 2010, Vol. 23, pp. 3888–3906, DOI: 10.1175/2010JCLI3297.1.
10. Bergsma E., Almar R., Almeida L. P., Sall M., On the operational use of UAVs for video-derived bathymetry, *Coastal Engineering*, 2019, Vol. 152(103527), DOI: 10.1016/j.coastaleng.2019.103527.
11. Cole S. T., Toole J. M., Lele R., Timmermans M.-L., Gallaher S. G., Stanton T. P., Shaw W. J., Hwang B., Maksym T., Wilkinson J. P., Ortiz M., Graber H., Rainville L., Petty A. A., Farrell S. L., Richter-Menge J. A., Haas C., Ice and ocean velocity in the Arctic marginal ice zone: Ice roughness and momentum transfer, *Elementa Science of the Anthropocene*, 2017, Vol. 5, No. 55, DOI: 10.1525/elementa.241.
12. Kozlov I. E., Atadzhanova O. A., Eddies in the marginal ice zone of Fram Strait and Svalbard from spaceborne SAR observations in winter, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Art. No. 134, 19 p., DOI: 10.3390/rs14010134.
13. Kozlov I. E., Artamonova A. V., Manucharyan G. E., Kubryakov A. A., Eddies in the Western Arctic Ocean from spaceborne SAR observations over open ocean and marginal ice zones, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2019, Vol. 124, pp. 6601–6616, DOI: 10.1029/2019JC015113.
14. Kozlov I. E., Plotnikov E., Manucharyan G., Brief Communication: Mesoscale and submesoscale dynamics in the marginal ice zone from sequential synthetic aperture radar observations, *The Cryosphere*, 2020, Vol. 14, pp. 2941–2947, DOI: 10.5194/tc-14-2941-2020.
15. Lopez-Acosta R., Schodlok M. P., Wilhelmus M. M., Ice Floe Tracker: An algorithm to automatically retrieve Lagrangian trajectories via feature matching from moderate-resolution visual imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 234(111406), DOI: 10.1016/j.rse.2019.111406.

16. Manucharyan G. E., Thompson A. F., Submesoscale sea ice-ocean interactions in marginal ice zones, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2017, Vol. 122, pp. 9455–9475, DOI: 10.1002/2017JC012895.
17. Manucharyan G. E., Lopez-Acosta R., Wilhelmus M. M., Spinning ice floes reveal intensification of mesoscale eddies in the western Arctic Ocean, *Scientific Reports*, 2022, Vol. 12, No. 7070, DOI: 10.1038/s41598-022-10712-z.
18. Olason E., Notz D., Drivers of variability in Arctic sea-ice drift speed, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2014, Vol. 119, pp. 5755–5775, DOI: 10.1002/2014JC009897.
19. Selivanova J., Verezemskaya P., Tilinina N., Gulev S., Dobrolyubov S., The importance of the sea ice marginal zone for the surface turbulent heat fluxes in Arctic on the basis of NCEP CFSR reanalysis, *Russian J. Earth Sciences*, 2021, Vol. 21(ES2003), DOI: 10.2205/2020ES000744.
20. Spreen G., Kwok R., Menemenlis D., Trends in Arctic sea ice drift and role of wind forcing: 1992–2009, *Geophysical Research Letters*, 2011, Vol. 38, Issue 19, Art. No. L19501, DOI: 10.1029/2011GL048970.
21. Toyota T., Haas C., Tamura T., Size distribution and shape properties of relatively small sea-ice floes in the Antarctic marginal ice zone in late winter, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2011, Vol. 58(9–10), pp. 1182–1193, DOI: 10.1016/j.dsr2.2010.10.034.
22. Wang M., König M., Oppelt N., Partial Shape Recognition for Sea Ice Motion Retrieval in the Marginal Ice Zone from Sentinel-1 and Sentinel-2, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13(21), Art. No. 4473, DOI: 10.3390/rs13214473.
23. Yurovsky Y. Y., Kubryakov A. A., Plotnikov E. V., Lishaev P. N., Submesoscale Currents from UAV: An Experiment over Small-Scale Eddies in the Coastal Black Sea, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Art. No. 3364, DOI: 10.3390/rs14143364.